

基于地貌演化阶段的公路泥石流危险性评价

陈远川^{1,2}, 陈洪凯², 唐红梅²

(1. 重庆文理学院 经济管理学院, 重庆 402160; 2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要:为了运用地学方法对公路泥石流危险性进行评价,建立了泥石流沟不同地貌演化阶段与泥石流灾害规模、频率的关系,构建了泥石流沟不同演化阶段与泥石流灾害危险性等级之间的映射关系,据此进行公路泥石流灾害危险性评价。以横断山区美姑河流域公路泥石流为例,从区域新构造应力场、泥石流物源和气象条件 3 个方面分析了泥石流灾害发育的宏观规律,并应用泥石流沟发育阶段与泥石流灾害危险性等级的映射关系评价美姑河流域沿河公路泥石流灾害危险性。研究结果表明:泥石流沟谷地貌的整个演化过程中,在壮年偏幼年期泥石流灾害危险性等级最高,各发育阶段按泥石流灾害危险性大小由高到低排序为壮年偏幼、壮年、幼年、壮年偏老、老年;横断山区美姑河流域公路泥石流沟 77.5% 处于危及公路地质安全的状态。

关键词:道路工程;山区沿河公路;公路泥石流;危险性评价;地貌演化;美姑河

中图分类号:U418.56;P642.23 **文献标志码:**A

Hazard assessment of debris flow along highway based on geomorphic evolution stages

CHEN Yuan-chuan^{1,2}, CHEN Hong-kai², TANG Hong-mei²

(1. School of Economics and Management, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the relationships between evolution stage of debris flow gully and disaster scale, frequency, and hazard level, highway debris flow hazard can be assessed. The macro-law of forming debris flow disaster in Meigu river basin was analyzed from the perspective of regional new tectonic stress field, material sources and meteorological conditions. The established relationship between evolution stage of debris flow gully and debris flow hazard level was applied to the highway debris flow hazard assessment for Meigu river. The results show that in strong-to-young stage the debris flow gully has the highest hazard level, and the rank of hazard level in life cycle of debris flow gully from high to low is strong-to-young, strong, young, strong-to-old and old. 77.5% of the debris flow gullies along Meigu river highway are in the state of endangering highway geology security.

Key words: road engineering; mountainous highway along river; debris flow along highway; hazard assessment; geomorphic evolution; Meigu river

0 引言

中国是一个多山的国家,山地丘陵占国土总面积三分之二以上。由于大量山区公路位于地质环境脆弱区、极端天气频发区,加之山区公路两侧部分小流域对降水条件的高敏感性和山区公路跨越山区小流域沟口等特殊的地形地貌位置特征,使得公路泥石流灾害成为导致山区公路毁损的重要灾害类型之一。泥石流灾害对公路承灾体地质安全的影响,主要体现为泥石流流体对各类公路工程结构物的冲击、磨蚀、淤埋、推挤和淤堵等毁损作用。因此开展山区公路泥石流灾害危险性评价研究有重要意义。陈洪凯等对公路泥石流灾害进行了系统研究,创立了公路泥石流这一泥石流分支学科,系统构建了公路泥石流减灾理论^[1];刘希林对泥石流灾害的单沟危险性和区划进行了长期研究,建立了单沟泥石流危险度的计算公式和泥石流危险度的理论模型^[2];刘光旭等综述了现有的泥石流危险性评价方法体系,认为泥石流的危险性研究已经由简单的自然属性描述发展到定量化、模型化评估^[3];Lin 等基于卡尔曼滤波建立了泥石流灾害危险性评价模型^[4];Kung 等针对中国台湾地区泥石流建立了灾害发生预测模型^[5];王春山等认为低频泥石流与高频泥石流相比,更易受人们忽视麻痹而危害严重,低频泥石流往往物源更加丰富、灾害规模更大,因此泥石流灾害事件规模与其发生频率间存在负相关关系^[6]。

本文以横断山区美姑河流域沿河公路为例,针对单沟的公路泥石流灾害危险性评价开展工作,从区域水系分布反演新构造应力场等方面得出了研究区泥石流灾害的宏观发育规律,从面积-高程积分、地貌信息熵的角度探讨了不同流域地貌演化阶段与泥石流灾害规模和频率的关系,建立了基于泥石流沟地貌演化阶段的公路泥石流灾害危险性评价方法,并应用该方法于研究区,对遴选的公路沿线泥石流沟得出了危险性评价等级。将地学方法用于公路泥石流危险性评价,可供山区公路建设、养护和管理部门减灾决策参考。

1 研究区公路泥石流灾害概况

四川省凉山州美姑河流域位于云贵高原与川西南山地过渡带,属横断山区东部边缘地区,介于东经

102.8°~103.5°和北纬 27.8°~28.7°之间,东北部大风山海拔最高 4 042 m,美姑河与金沙江汇合口海拔最低 436 m,流域内地形起伏,地势陡峻,“V”型河谷发育。美姑河为长江上游金沙江左岸一级支流,流域面积约 3 234 km²。

美姑河流域公路泥石流灾害主要为降雨诱发型,4 月降雨开始增多,5~10 月降雨约占全年 91%,雨型既有暴雨,也有绵雨。径流随降雨和气温的变化而变化,4~5 月由降雨及融雪补给,6~10 月主要由降雨形成,11 月后渐以地下水补给为主。多年平均年降雨量为 820.70 mm,历年日最大降水量为 110.3 mm,时最大降水量为 36.3 mm。

美姑河流域地质环境脆弱,断层、褶皱发育,流域内泥石流等山地地貌灾害发育,尤其以每年汛期 5~9 月发生的地质灾害频率高、规模大。流域内省道公路(S307、S103)主要沿美姑河展线,是典型的山区沿河公路,小流域山洪、河道洪水、泥石流等地质风险经常危及公路的地质安全。该沿河公路每年因泥石流等不良地质条件造成公路直接经济损失数千万元,公路泥石流平均每年断道 15 d 左右^[7]。如 2002 年 7 月发生 20 年一遇大暴雨,12 条泥石流沟同时暴发泥石流灾害,公路断道 30 余天。2011 年 6 月 16 日夜至 17 日凌晨,突降特大暴雨,引发山洪泥石流灾害,美姑境内 S103 线 K424+500 处断道,发生泥石流塌方 1.3×10^4 m³,产生路基缺口 22 处共 700 m,涵洞淤塞 37 道;X149 峨美路(峨边—美姑)路基冲毁 110 m,涵洞淤塞 14 道,共计经济损失 699 万元。美姑县公路局投入人工 180 人次、挖掘机 9 个台班、装载机 15 个台班、资金 50 万元进行抢险。

2 研究区泥石流沟发育宏观背景

泥石流的发育主要受降水、地形和物源等条件控制,从区域新构造应力场、泥石流物源和气象条件几方面分析研究区泥石流灾害发育的宏观规律^[8]。

2.1 区域新构造应力场特征与泥石流发育

基于美国航空航天局的 SRTM-DEM 数据,采用 GIS 水文分析技术提取美姑河流域的水系数据,水系折线化(下页图 1)求解流域的水系分布玫瑰图,采用沙伊德格尔法求解研究区的新构造应力场^[9]。研究区的水系分布玫瑰图(下页图 2)大致反映水系分布优势方向,计算得到 2 条最大的水系走

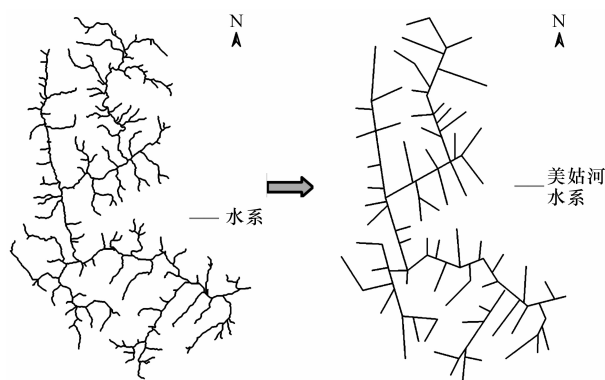


图1 美姑河流域水系折线化

Fig. 1 Drainage linearization in Meigu river basin

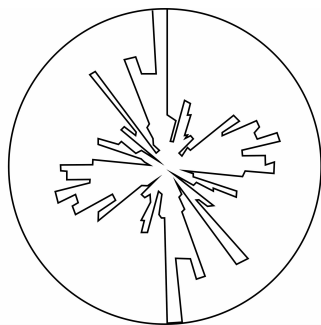


图2 美姑河流域水系分布玫瑰图

Fig. 2 Rose diagram of water system distribution in Meigu river basin

向 a_1 和 a_2 分别为 168° 和 72° , 所夹钝角平分线为 120° , 所夹锐角平分线为 30° 。沙伊德格尔认为, 剪裂面易发育为水系, 根据莫尔库仑原理, 2 个破裂面所夹钝角等分线可表示主张应力方向, 锐角等分线可表示主压应力方向。因此 30° 为构造应力场的主压应力方向, 2 个剪切带方向 Max_1 和 Max_2 分别为 72° 和 168° 。统计发现研究区泥石流沟的轴线方向存在两大优势方向, 分别为 78.2° 和 160.5° , 前者与新构造应力场剪切带 Max_1 相差 6.2° , 后者与剪切带 Max_2 相差 7.5° 。因此, 可以认为区内泥石流沟的发育宏观上与新构造应力场的剪切带方向一致, 符合沙伊德格尔提出的地貌发育对抗性原理。对抗性原理指出, 新构造应力场的剪切带方向地表破碎, 易于发生地表径流作用下的泥石流等水土流失现象, 而新构造应力场的主压应力方向则易于发生崩塌、滑坡灾害, 因此泥石流沟的两侧边坡多易于发生崩滑灾害。

2.2 公路泥石流物源分析

美姑河流域地处中国横断山区, 断层、褶皱发育, 地质环境脆弱, 具有丰富的泥石流物源。流域内

第4系的洪积、残坡积和滑坡堆积物主要分布于沟谷和边坡地带。岩层含灰岩、砂岩及易被风化侵蚀的泥岩和粉砂岩。流域内断层发育、地表破碎, 破碎岩体主要为雷口坡组岩层和白果湾组地层, 残坡积物一般厚 $0.5 \sim 10$ m, 由强风化砂岩、粉砂岩、泥岩等未固结的块碎石土组成, 粒径一般为 $3 \sim 12$ cm, 棱角状, 粒间充填细小颗粒及粘土, 透水性较好。流域内地势陡峻, 高低悬殊, 深切“V”型谷发育。洛俄依甘乡美姑大桥以上区域属于高原丘陵山区。流域内除河源区有部分森林外, 其余地区植被覆盖率较低, 土壤裸露面积大, 水土流失现象严重。汛期雨季时, 地表径流对地表裸露土层的冲蚀、泥石流沟谷两侧岸坡的塌方为公路泥石流灾害的主要固体物质来源。

2.3 研究区气象特征与泥石流发育

研究区属于川西高原气候区, 有“春干、秋润、冬寒、夏凉”的山区气候特征。由于区内地势高差悬殊, 立体气候特性也较明显。流域上游分水岭处属亚寒带高寒山区, 积雪时间长。气温随高程降低而升高, 至金沙江汇口处属亚热带气候, 有干热少雨的干热河谷气候特征。流域内年降雨量大致由西北向东南递减。据美姑气象站历年资料统计, 多年平均气温 11.4°C , 极端最高气温 32.3°C (1979年6月3日), 极端最低气温 -10.7°C (1975年12月14日)。每年5~10月为雨季, 11月至翌年4月为干季节, 其中雨季降水量约为全年降水量的91%, 多年平均降雨量 820.70 mm, 历年日最大降水量为 110.3 mm, 时最大降水量为 36.3 mm。年降雨大部分集中在6~8月。美姑河流域泥石流灾害多为降雨诱发型, 区内既有暴雨, 也有绵雨。历史泥石流灾害统计得出, 区内诱发泥石流灾害临界降雨阈值为 $120 \sim 150$ mm 的前期降雨量与 $16 \sim 25$ mm/10 min 的降雨强度的组合^[7,9-10]。研究区干热河谷内夏季岩土体干裂并辅以极端降雨的激发, 易于诱发泥石流沟岸的崩滑。研究区位于大凉山的西侧短陷盆地内, 东部的暖湿气流越过太凉山易于产生焚风效应, 致使区内沟谷植被覆盖率偏低, 地表易于水土流失。

因此, 美姑河流域干热河谷中岩土干裂与极端降雨的耦合和具有焚风效应的气象条件是泥石流灾害发育的重要原因。

3 灾害规模、频率与地貌演化阶段的关系

泥石流沟谷地貌演化的不同阶段具有不同的泥石流灾害发育条件,泥石流发育条件的不同组合可形成不同规模和频率的地貌灾害现象,因此探讨泥石流沟谷地貌演化阶段与泥石流灾害规模、频率的关系,对于山区公路泥石流灾害危险性评价有一定的指导意义。

3.1 泥石流沟谷地貌演化阶段

地貌信息熵是判定侵蚀流域稳定性的定量指标,它以流域的面积-高程积分和信息熵原理为基础,通过地貌信息熵值与标准值对比即可判断侵蚀流域的地貌演化发育阶段,因此采用地貌信息熵理论可量化泥石流沟谷的地貌演化阶段^[11-12]。地貌信息熵的计算步骤如下所示。

(1)采用 GIS 的地形分析功能测量出泥石流沟每条等高线以上的面积(a),每条等高线与泥石流沟最低点的高差(h),分别与泥石流沟总面积(A)和泥石流沟的总高差(R)相比,建立函数关系式

$$y=f(x) \tag{1}$$

式中: $x=a/A$; $y=h/R$ 。

(2)对式(1)进行积分,有

$$S=\int_0^1 f(x)dx \tag{2}$$

(3)根据艾南山建立的侵蚀流域地貌演化密度函数,计算泥石流沟的地貌信息熵 G ^[12]

$$G=S-\ln(S)-1 \tag{3}$$

式中: G 为地貌信息熵; S 为面积-高程积分值。

将式(2)代入式(3),有

$$G=\int_0^1 f(x)dx-\ln\left(\int_0^1 f(x)dx\right)-1 \tag{4}$$

根据侵蚀流域发育的一般规律,泥石流灾害在地貌发育的壮年期危险性相对较大,因此有必要对壮年期进行细化,修正艾南山教授建立的侵蚀流域地貌演化阶段划分标准^[12]。将地貌演化的壮年期细化为壮年偏幼年期、壮年期、壮年偏老年期,新的侵蚀流域地貌演化阶段划分标准见表 1。

3.2 不同地貌演化阶段泥石流灾害规模和频率分析

一般情况下,幼年期的沟谷,泥石流灾害发生频率高,但是灾害规模一般不大;壮年期的沟谷,泥石流

表 1 侵蚀流域地貌演化阶段划分标准

Tab.1 Geomorphic evolution stage division standard for erosion watershed

地貌信息熵	发育阶段	地形地貌特征
<0.11	幼年	地势崎岖,流域切割侵蚀强烈,地表起伏大,水系分支复杂
(0.11,0.15)	壮年偏幼年	流域侵蚀作用减少,地势趋向平缓,地势起伏变化比较大,松散碎屑物质迅速积累,形成区不断扩大
(0.15,0.25)	壮年	
(0.25,0.40)	壮年偏老年	
≥0.40	老年	地势平缓,流域宽广,沟槽稳定。

灾害发生的频率稍低,灾害规模增大;老年期的沟谷,泥石流灾害爆发的频率和规模都较低。泥石流沟谷演化阶段与灾害规模、频率的定性关系和灾害规模、频率的分级赋值见表 2。

表 2 沟谷发育阶段与灾害规模、频率及危险性大小的关系

Tab.2 Relationship between gully evolution stage and disaster scale, frequency and hazard level

发育阶段	频率 F	F 赋值	规模 M	M 赋值	危险性 H	危险性等级
幼年	极高	5	较小→较大	2→3	12.5	较危险(C)
壮年偏幼年	高	4	大	4	16.0	极危险(A)
壮年	较高	3	极大	5	15.0	危险(B)
壮年偏老年	较低	2	较大→较小	3→2	5.0	较安全(D)
老年	低	1	小	1	1.0	安全(E)

4 泥石流灾害危险性评价

4.1 泥石流危险性计算的理论模型

泥石流规模 M 和泥石流发生频率 F 是反映泥石流灾害危险性 H 的 2 个关键变量,刘希林定义泥石流灾害危险性大小的理论表达式为

$$H=MF \tag{5}$$

相关研究表明,泥石流灾害事件的规模和其发生的频率间存在负相关的非线性函数关系(下页图 3),该函数关系可用如下的指数函数来近似表示

$$F(M)=ae^{-bM} \tag{6}$$

式中, $F(M)$ 为规模 M 的泥石流灾害事件发生频率; M 为泥石流灾害规模(m^3); a 、 b 为待定系数。

刘希林定义泥石流危险性大小为图 3 所示的灾害规模-频率曲线下的定积分面积,并令 $a=b$,将泥石流危险性大小取值范围限定为 0~1,泥石流危险性理论计算公式为^[2]

$$H=\int_0^M F(M)dM \quad (a>0) \tag{7}$$

如图 3 所示, $F(M)=ae^{-bM}$,令 $a=b$,代入式(7)得

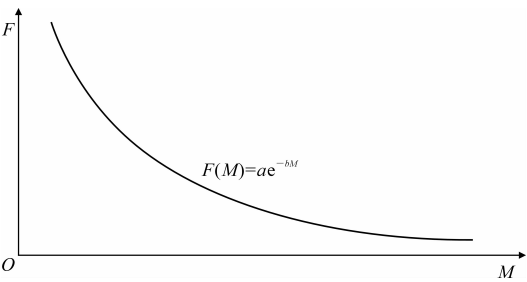


图 3 泥石流灾害规模与发生频率的关系
Fig. 3 Relationship between debris flow disaster scale and its frequency

$$H=\int_0^M ae^{-aM}dM=1-e^{-aM} \quad (a>0) \quad (8)$$

其中 H 取值为 $0\sim1$ 。

由于目前尚未找到一个普适性的系数 a 来求解不同研究区域的泥石流灾害危险性大小,因此若能采用间接或经验估算的方法来定性得出泥石流灾害事件规模及发生频率,对于泥石流灾害危险性评价仍然有一定实用意义。

4.2 基于地貌演化阶段的泥石流灾害危险性评价

根据表 2 定性得出的泥石流沟谷发育阶段与灾害规模、频率的对应关系,对规模和频率进行分级量化,由式(5)确定泥石流沟谷不同地貌演化阶段的危险性大小,并借助危险性矩阵进行泥石流沟谷不同地貌演化阶段的灾害危险性评价。危险性等级从极危险(A)到安全(E)划分为 5 个等级(表 2)。随泥石流沟谷不同的地貌演化阶段,泥石流灾害危险性的变化趋势见危险性矩阵(图 4)。危险性矩阵的横轴为灾害频率、纵轴为灾害规模,矩阵的左下角危险性最低、右上角危险性最高。一般,泥石流沟谷地貌演化从幼年期到老年期的整个过程中,泥石流灾害危险性总的变化趋势是先增高再降低,在壮年偏幼年期泥石流灾害危险性等级最高为极危险(A);各发育阶段根据泥石流灾害危险度由高到低排序,依次为:壮年偏幼年期(A)、壮年期(B)、幼年期(C)、壮年偏老年期(D)、老年期(E)。

5 实例分析

针对美姑河流域沿河公路,遴选公路沿线 40 个流域面积为 $6.87\sim156.49\text{ km}^2$ 的泥石流沟进行危险性评价,如图 5 所示,图 5 中,1~40 表示流域编号。由量测的基础数据计算每个泥石流沟的面积-高程积分、地貌信息熵,进而确定泥石流沟的地貌演化阶段,根据前述泥石流沟不同演化阶段与泥石流灾害危险性等级之间的对应关系得出各公路泥石流

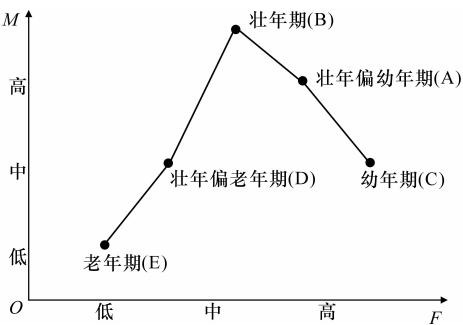


图 4 泥石流灾害危险性分析矩阵
Fig. 4 Hazard analysis matrix for debris flow disaster

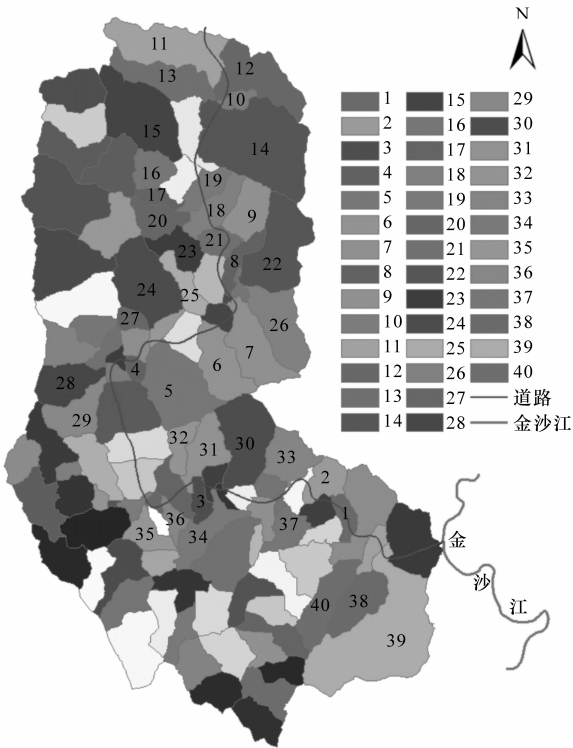


图 5 美姑河流域沿河公路泥石流沟
Fig. 5 Debris flow gullies along river bank highway in Meigu river basin

沟的危险性等级(下页表 3)。

遴选的研究区 40 个沿河公路泥石流沟谷危险性评价结果中,7 个处于极危险的壮年偏幼年期,占 17.5%;19 个处于危险的壮年期,占 47.5%;5 个处于较危险的幼年期,占 12.5%;6 个处于较安全的壮年偏老期,占 15%;3 个处于安全的老年期,占 7.5%。因此,美姑河流域沿河公路两侧的公路泥石流沟 77.5%处于危及公路地质安全的状态,与该区域的公路泥石流灾情基本吻合,应主动采取技术可行、经济合理的减灾对策,加强研究区公路抗御泥石流灾害的能力,合理规避地质风险。

表 3 美姑河流域沿河公路泥石流灾害危险性评价

Tab. 3 Hazard assessment of debris flow along river bank highway in Meigu river basin

流域编号	流域面积/km ²	流域相对高差/km	拟合方程	S	G	发育阶段	危险性等级
1	12.710	2.20	$y=-0.537x^3+0.316x^2-0.721x+0.997$	0.608	0.106	幼年	较危险(C)
2	22.580	2.70	$y=-2.320x^3+3.551x^2-2.203x+0.989$	0.491	0.202	壮年	危险(B)
3	11.970	1.17	$y=-2.773x^3+4.390x^2-2.916x+1.152$	0.464	0.232	壮年	危险(B)
4	6.870	1.20	$y=-1.703x^3+2.468x^2-1.739x+1.065$	0.592	0.116	壮年偏幼年	极危险(A)
5	71.610	1.63	$y=-2.444x^3+3.612x^2-2.020x+0.905$	0.488	0.205	壮年	危险(B)
6	45.200	1.90	$y=-2.628x^3+4.540x^2-2.959x+1.075$	0.452	0.246	壮年	危险(B)
7	50.220	2.00	$y=-2.778x^3+4.893x^2-3.270x+1.260$	0.562	0.138	壮年偏幼年	极危险(A)
8	16.620	1.20	$y=-1.101x^3+1.335x^2-1.126x+0.967$	0.574	0.129	壮年偏幼年	极危险(A)
9	32.180	1.70	$y=-1.022x^3+1.891x^2-1.767x+0.960$	0.451	0.247	壮年	危险(B)
10	8.840	0.98	$y=-1.664x^3+2.948x^2-2.153x+0.944$	0.434	0.269	壮年偏老年	较安全/D
11	73.500	1.50	$y=-2.110x^3+3.601x^2-2.368x+0.929$	0.418	0.290	壮年偏老年	较安全/D
12	59.118	1.65	$y=-2.785x^3+4.472x^2-2.780x+1.090$	0.494	0.199	壮年	危险(B)
13	44.005	1.46	$y=-1.591x^3+2.819x^2-2.083x+0.887$	0.388	0.335	壮年偏老年	较安全/D
14	133.902	1.65	$y=-0.290x^3+0.449x^2-1.088x+0.959$	0.492	0.201	壮年	危险(B)
15	78.745	1.63	$y=-1.883x^3+3.103x^2-2.092x+0.911$	0.428	0.277	壮年偏老年	较安全/D
16	21.884	0.85	$y=-1.385x^3+1.950x^2-1.475x+0.949$	0.515	0.179	壮年	危险(B)
17	9.658	0.93	$y=-0.484x^3+0.458x^2-0.855x+0.892$	0.496	0.197	壮年	危险(B)
18	28.191	1.70	$y=-2.257x^3+4.289x^2-3.014x+0.907$	0.266	0.590	老年	安全/E
19	19.579	1.42	$y=-1.440x^3+2.759x^2-2.281x+0.913$	0.332	0.435	老年	安全/E
20	24.786	0.92	$y=-0.691x^3+1.099x^2-1.274x+0.858$	0.415	0.294	壮年偏老年	较安全/D
21	15.549	0.95	$y=-1.760x^3+3.046x^2-2.209x+0.849$	0.320	0.459	老年	安全/E
22	73.529	1.80	$y=-2.072x^3+3.308x^2-2.102x+0.945$	0.479	0.215	壮年	危险(B)
23	24.314	0.82	$y=-2.690x^3+4.230x^2-2.298x+0.833$	0.421	0.286	壮年偏老年	较安全/D
24	67.256	1.07	$y=-1.714x^3+2.615x^2-1.761x+0.920$	0.477	0.217	壮年	危险(B)
25	19.325	0.80	$y=-2.919x^3+3.609x^2-1.556x+0.930$	0.625	0.095	幼年	较危险(C)
26	52.432	1.95	$y=-2.913x^3+4.792x^2-2.796x+1.046$	0.517	0.177	壮年	危险(B)
27	9.120	0.90	$y=-1.070x^3+1.499x^2-1.379x+0.994$	0.536	0.160	壮年	危险(B)
28	35.838	1.40	$y=-1.887x^3+2.537x^2-1.615x+1.008$	0.575	0.128	壮年偏幼年	极危险(A)
29	33.373	1.25	$y=-1.853x^3+2.017x^2-1.051x+0.968$	0.651	0.080	幼年	较危险(C)
30	64.943	2.55	$y=-2.245x^3+3.385x^2-2.001x+1.029$	0.596	0.114	壮年偏幼年	极危险(A)
31	32.976	1.90	$y=-1.643x^3+2.367x^2-1.725x+0.963$	0.479	0.215	壮年	危险(B)
32	16.925	1.80	$y=-1.595x^3+1.818x^2-1.147x+0.910$	0.544	0.153	壮年	危险(B)
33	34.281	2.40	$y=-0.734x^3+1.155x^2-1.347x+0.969$	0.497	0.196	壮年	危险(B)
34	33.640	1.50	$y=-4.306x^3+6.287x^2-3.098x+1.325$	0.795	0.024	幼年	较危险(C)
35	19.476	1.35	$y=-1.882x^3+2.541x^2-1.527x+0.953$	0.566	0.135	壮年偏幼年	极危险(A)
36	10.656	1.27	$y=-0.845x^3+0.968x^2-0.940x+0.962$	0.602	0.109	幼年	较危险(C)
37	21.186	2.15	$y=-2.125x^3+3.566x^2-2.507x+1.190$	0.590	0.118	壮年偏幼年	极危险(A)
38	39.008	3.00	$y=-2.097x^3+3.407x^2-2.178x+0.928$	0.451	0.247	壮年	危险(B)
39	156.481	3.45	$y=-1.074x^3+1.719x^2-1.513x+0.953$	0.501	0.192	壮年	危险(B)
40	40.059	3.05	$y=-1.686x^3+2.632x^2-1.831x+0.967$	0.507	0.186	壮年	危险(B)

6 结 语

(1)根据泥石流沟不同地貌演化阶段与泥石流

灾害规模、频率的关系,初步建立了泥石流沟不同发育阶段与泥石流灾害危险性等级之间的映射关系,可据此进行泥石流地貌灾害危险性评价。

(2)一般情况下,泥石流沟谷地貌演化从幼年期到老年期的整个过程中,泥石流灾害危险性总的变化趋势是先增高再降低,在壮年偏幼年期泥石流灾害危险性等级最高为极危险;各发育阶段根据泥石流灾害危险性由高到低排序,依次为:壮年偏幼年期、壮年期、幼年期、壮年偏老年期、老年期。

(3)美姑河流域内泥石流沟的发育宏观上与新构造应力场的剪切带方向一致,符合地貌演化的对抗性原理。美姑河流域干热河谷中岩土干裂与极端降雨的耦合和具有焚风效应的气象条件是泥石流灾害发育的重要原因。美姑河流域处于横断山区地质环境脆弱带,地形陡峻、断层、褶皱发育,为泥石流灾害发育提供了丰富的固体物源。

(4)将建立的基于泥石流沟地貌演化阶段的公路泥石流灾害危险性评价方法应用于美姑河流域中,选取的美姑河流域沿河公路两侧的泥石流沟中,17.5%处于极危险的壮年偏幼期,47.5%处于危险的壮年期,12.5%处于较危险的幼年期,评价结果可供研究区公路养护管理部门参考。

参考文献:

References:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥.中国公路泥石流研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):1-5.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, YE Si-qiao. Study on debris flow along highways in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008,19(1):1-5. (in Chinese)
- [2] 刘希林.沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例[J].防灾减灾工程学报,2010,30(3):241-245,261.
LIU Xi-lin. Quantitative assessment on site-specific debris flow hazard and application[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010,30(3):241-245,261. (in Chinese)
- [3] 刘光旭,戴尔阜,吴绍洪,等.泥石流灾害风险评估理论与方法研究[J].地理科学进展,2012,31(3):383-391.
LIU Guang-xu, DAI Er-fu, WU Shao-hong, et al. A study on theory and method in debris flow risk assessment[J]. Progress in Geogaphy, 2012,31(3):383-391. (in Chinese)
- [4] Lin J W, Chen C W, Peng C Y. Kalman filter decision systems for debris flow hazard assessment[J]. Nat Hazards, 2012,60(3):1255-1266.
- [5] Kung H Y, Chen C H, Ku H H. Designing intelligent

disaster prediction models and systems for debris-flow disasters in Taiwan[J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(5):5838-5856.

- [6] 王春山,巴仁基,刘宇杰,等.低频泥石流特征及其危险性的模糊综合评判[J].人民长江,2012,43(5):42-46.
WANG Chun-shan, BA Ren-ji, LIU Yu-jie, et al. Characteristics of low-frequency debris flow and its risk assessment based of fuzzy comprehensive evaluation[J]. Yangtze River, 2012,43(5):42-46. (in Chinese)
- [7] 唐红梅,陈洪凯,金发均,等.美姑河流域公路泥石流物源成因[J].山地学报,2005,23(6):714-718.
TANG Hong-mei, CHEN Hong-kai, JIN Fa-jun, et al. Research on material sources of forming a debris flow along highway in the Meigu river basin[J]. Journal of Mountain Science, 2005,23(6):714-718. (in Chinese)
- [8] 宋志,李宗亮,巴仁基,等.贡嘎山东坡雅家埂河特大型泥石流动力学特征[J].地球科学与环境学报,2010,32(4):416-419.
SONG Zhi, LI Zong-liang, BA Ren-ji, et al. Kinetic characteristics of oversize mud-rock flow in yajiangeng river of eastern gongga mountain[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010,32(4):416-419. (in Chinese)
- [9] 艾南山,陈洪凯,李后强.从新构造应力场论公路水毁问题——兼论地貌发育的对抗性原理[J].地理科学,1996,16(4):298-304.
AI Nan-shan, CHEN Hong-kai, LI Hou-qiang. Impact of the neotectonic stress field on failure and washout of road[J]. Scientia Geographica Sinica, 1996,16(4):298-304. (in Chinese)
- [10] 张强,陈洪凯.川藏公路德达-波戈溪沿线沟谷信息熵的探讨[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(增1):686-690.
ZHANG Qiang, CHEN Hong-kai. Gully information entropy along the Deda-Bogexi of Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2011,30(S1):686-690. (in Chinese)
- [11] Strahler A N. Quantitative slope analysis[J]. Geological Society of America Bulletin, 1956,67(2):571-596.
- [12] 艾南山.侵蚀流域系统的信息熵[J].水土保持学报,1987,1(2):1-7.
Ai Nan-shan. The information entropy in erosional drainage-system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987,1(2):1-7. (in Chinese)